

## Секция 2: Инновационные технологии получения и обработки материалов в машиностроении

Из результатов таблицы 3 следует, что извлечение марганца составило 88,7 – 91 %, а полученный сплав содержал 51,2 – 52,7 % марганца и 24,1 – 24,8 % кремния.

При определении оптимального состава брикетов было установлено, что при использовании брикетов состава, масс. %:

- продукт термического обжига карбонатной марганцевой руды  $((\text{Ca}, \text{Mg})(\text{Mn}, \text{Fe})_2\text{O}_4 - 64, \text{MnO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 - 23, \text{SiO}_2 \text{ и другие оксиды} - 12) - 48 - 52$ ;
- комплексный саморассыпавшийся сплав ( $\text{Mn} - 22,17 \%$ ,  $\text{Si} - 42,55 \%$ )  $48 - 44$ ;
- связующее – 4.

Извлечение марганца из продукта термического обжига составляет 88 – 91 %.

Брикеты приведенного состава целесообразно применять при обработке стали марганецсодержащими материалами в ковше, на агрегате типа «печь-ковш», что позволяет выплавлять сталь с содержанием марганца до 2 % без использования стандартных марганцевых ферросплавов, при этом использование комплексного саморассыпавшегося сплава (40 – 45 % Si, 25 – 30 % Mn) обеспечивает высокое извлечение марганца (80 – 85 %), снижение доли фосфора, ликвидируются затраты на дробление восстановителя.

Литература.

1. Тигунов Л.П. Марганец: геология, производство, использование / Л.П. Тигунов, Л.А. Смирнов, Р.А. Минаджиева. – Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2006. – 184 с.
2. Борисов С.М. Результаты геологоразведочных работ на марганцевые руды в Кемеровской области / С.М. Борисов, А.В. Зябкин, С.С. Старкин // Сб. научных трудов «Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем. – Красноярск: 2001. – С. 36 – 38.
3. Серов Г.В. О промышленном освоении Усинского месторождения марганцевых руд / Г.В. Серов, В.И. Хобот, А.П. Литвиненко // Сталь. – 2006. – № 11. – С. 83 – 86.
4. Пат. № 2005803 РФ МКИ С22С33/04 Способ производства ферромарганца для сварочного производства / Толстогузов Н.В., Рожихина И.Д., Нохрина О.И. и др. – № 5034207/02; заявл. 26.03.92; опубл. 15.01.04. Бюл. № 1.

### РАЗДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

*Н.А. Сапрыкина, ст. преподаватель, А.А. Сапрыкин, к.т.н., доц.*

*Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского*

*Томского политехнического университета*

*652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26*

*E-mail: nat\_anat\_sapr@mail.ru*

В современной экономике для снижения затрат на изготовление конкурентоспособной продукции применяют технологии быстрого прототипирования. С их помощью можно создавать изделия любой геометрической сложности без предварительных затрат на подготовку средств технологического оснащения. К настоящему времени известно большое количество технологий быстрого прототипирования, которые отличаются друг от друга применяемым материалом и способом формообразования изделия [1]. Основными являются стереолитография (СЛ), послойная укладка расплавленной полимерной нити (FDM), изготовление объектов с использованием технологии ламинирования (LOM), селективное лазерное спекание (СЛС), которые находят применение в литейном производстве, промышленном дизайне, медицине (имплантаты) и других сферах. Наибольшие перспективы имеет метод селективного лазерного спекания (плавления) физической копии различных объектов из порошковых материалов на основе 3D CAD-модели, который позволяет изготавливать функциональные изделия [2]. Данная технология предусматривает использование широкого спектра исходных материалов – от пластиков до различных металлических сплавов [3]. В результате смешивания различных порошковых материалов можно создавать сплавы, недоступные для обычных способов изготовления. Термическое воздействие лазерного излучения на порошковый материал значительно влияет на качество изделий и сопровождается достаточно сложными и разнообразными по своей природе физическими явлениями, а качественные изделия можно получить только в узком диапазоне режимов [4]. Для улучшения качества спеченных изделий в большинстве случаев применяют последующую обработку [5]. Но методы пост-обработки не позволяют управлять геометрическими и микрогеометрическими параметрами получаемых поверхностей, поэтому необходимо достигать высоко-

го качества спеченного поверхностного слоя технологическими методами [6]. Определение рациональных технологических режимов лазерного спекания металлических порошковых материалов для заданных параметров качества поверхностного слоя представляет собой сложную и актуальную задачу [7-9]. В данной работе рассмотрено влияние условий лазерного спекания на шероховатость спеченной поверхности из медного порошкового материала ПМС-1. Получена математическая зависимость шероховатости спеченного поверхностного слоя из медного порошкового материала ПМС-1 от технологических режимов спекания. Предложено улучшение качества спеченной поверхности изделия и его внутреннего объема за счет разделения технологических режимов спекания на черновой, чистовой и отделочный.

Порошок медный стабилизированный ПМС-1 находит широкое применение в различных областях промышленности. Частицы порошка имеют сферическую форму с номинальным размером 0,007 мм, насыпной плотностью 1,25-1,9 г/см<sup>3</sup>. Коэффициент теплопроводности медного порошка равен 3,6×10-3Вт/(м·°С), температура плавления 1030-1070 °С [10]. Шероховатость спеченного слоя определяли на микроскопе LEXT OLS 4100 (OLYMPUS).

Эксперименты реализованы на установке послойного лазерного спекания оригинальной конструкции, которая позволяет регулировать все технологические процессы спекания. Установка представляет собой технологический лазерный комплекс формирования поверхностей изделий сложной пространственной формы, состоящей из иттербиевого волоконного лазера ЛК – 100 – В, трехкоординатного стола, персонального компьютера, системы ЧПУ и оригинального программного обеспечения. Перемещение по координатам X, Y, Z осуществляется через шаровинтовую пару с помощью шаговых двигателей. Иттербиевый волоконный лазер с длиной волны 1,07 мкм позволяет регулировать мощность от 10 до 100 Вт. Постоянная мощность на выходе и точность фокусировки волоконного лазера обеспечивает качество и точность изготавливаемых изделий. Управление лучом лазера с помощью специальной программы в рабочей зоне размером 100х100х100 мм позволяет осуществлять сканирование по любому заданному контуру. После спекания единичного слоя стол опускается с помощью шагового двигателя на требуемую величину (толщину слоя) [11].

При изготовлении изделий методом послойного лазерного спекания необходимо разделять качество изделия и его внутреннего объема. При синтезе внутреннего объема необходимо назначать режимы спекания таким образом, чтобы обеспечивалась повышенная шероховатость спеченной поверхности. Это необходимо для прочности сцепления слоев между собой и предотвращения расслаивания. Внешняя поверхность изделия должна быть получена на других режимах, обеспечивающих небольшую шероховатость. Шероховатость спеченной поверхности зависит от большого числа факторов, связанных с режимами спекания, свойствами порошкового материала, техническими решениями. В процессе проведенных исследований были выявлены основные управляемые параметры, влияющие на формирование микропрофиля спеченной поверхности. – мощность лазерного излучения  $P$ , скорость перемещения луча лазера  $V$ , шаг сканирования  $s$ , предварительная температура подогрева порошкового материала  $t$ , влияние защитного газа аргона и механоактивации порошка [12]. На первом этапе проводились предварительные поисковые эксперименты для определения приемлемых режимов спекания. Под ними подразумевались режимы, когда единичный слой не рассыпался от прикосновения, т.е. обладал некоторой механической прочностью без значительной деформации. Эксперименты по определению рациональных режимов спекания медного порошкового материала ПМС-1 показали, что мощность лазера менее 15 Вт и скорость перемещения луча лазера более 3000 мм/мин являются недостаточными для спекания порошкового материала. При мощности более 30 Вт и скорости менее 200 мм/мин происходило интенсивное окисление и возгорание порошка. Увеличение шага сканирования более 0,3 мм не позволяло единичным трекам спекаться между собой, что препятствовало образованию единичного слоя. Увеличение температуры подогрева порошкового материала положительно сказывалось на прочности единичного слоя. Для порошкового материала ПМС-1 образцы получались при изменении мощности излучения лазера  $P$  от 15 до 30 Вт, скорости перемещения луча лазера  $V$  от 200 до 3000 мм/мин, шага сканирования  $S$  от 0,1 до 0,3 мм, температуры подогрева порошкового материала  $t$  с 26 до 200 °С. Для установления математической зависимости шероховатости спеченного слоя от технологических режимов спекания был поставлен четырехфакторный эксперимент. Уровни факторов и интервалы варьирования выбирались по результатам предварительных поисковых экспериментов. The resulting regression equation model was in the form of an expression as follows:

$$R_z = 356 + 15 \cdot P - 0.1 \cdot V - 0.057 \cdot t + 425 \cdot S \quad (1)$$

Зависимость шероховатости спеченного слоя от режимов спекания показана на рисунке 1.

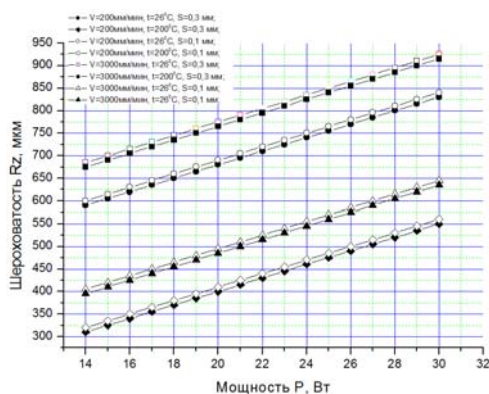


Рис. 1. Диаграмма влияния режимов спекания на шероховатость спеченной поверхности  $Rz$ .

Изменение мощности от 15 до 30 Вт приводит к увеличению шероховатости спеченного слоя  $Rz$  с 600 до 830 мкм, рисунок 2 и приводит к появлению деформаций и трещин. Таким образом, мощность луча лазера оказывает значительное влияние на шероховатость спеченной поверхности.



Рис. 2. Внешний вид спеченной поверхности ПМС-1 (x2), режимы спекания:

- а –  $P = 30 \text{ Вт}$ ,  $V = 200 \text{ мм/мин}$ ,  $t = 26^\circ\text{C}$ ,  $s = 0.3 \text{ мм}$   
 б –  $P = 15 \text{ Вт}$ ,  $V = 200 \text{ мм/мин}$ ,  $t = 26^\circ\text{C}$ ,  $s = 0.3 \text{ мм}$ .

Увеличение скорости перемещения луча лазера с 3000 до 200 мм/мин приводит к увеличению шероховатости спеченной поверхности  $Rz$  с 320 до 600 мкм, рисунок 3.

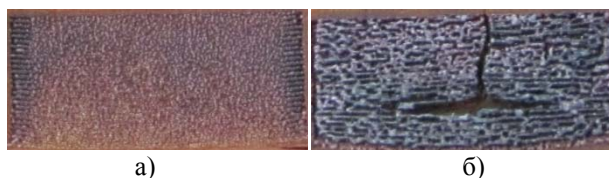


Рис. 3. Внешний вид спеченной поверхности ПМС-1 (x2), режимы спекания:

- а –  $P = 15 \text{ Вт}$ ,  $V = 3000 \text{ мм/мин}$ ,  $t = 200^\circ\text{C}$ ,  $s = 0.3 \text{ мм}$   
 б –  $P = 15 \text{ Вт}$ ,  $V = 200 \text{ мм/мин}$ ,  $t = 200^\circ\text{C}$ ,  $s = 0.3 \text{ мм}$ .

Увеличение шага сканирования с 0,1 до 0,3 мм, рисунок 4, приводит к увеличению шероховатости поверхности с 600 до 700 мкм, уменьшению размеров дефектов.



Рис. 4. Внешний вид спеченной поверхности ПМС-1 (x2), режимы спекания:

- а –  $P = 30 \text{ Вт}$ ,  $V = 0.2 \text{ мм/мин}$ ,  $t = 200^\circ\text{C}$ ,  $s = 0.1 \text{ мм}$   
 б –  $P = 30 \text{ Вт}$ ,  $V = 200 \text{ мм/мин}$ ,  $t = 200^\circ\text{C}$ ,  $s = 0.3 \text{ мм}$ .

Температура подогрева порошкового материала имеет не значительное влияние на качество спеченного поверхностного слоя как мощность и скорость лазера. Подогрев порошкового материала способствует увеличению толщины спеченного слоя, уменьшению диаметра коагулированных частиц и шероховатости, улучшению прочностных характеристик.

Проводились эксперименты по влиянию защитного газа аргона, рисунок 5 и механоактивации порошка на качество спеченного поверхностного слоя. Спекание в аргоне показало улучшение прочностных характеристик поверхностного слоя без образования трещин. При сравнении образцов, полученных на режимах  $P=30$  Вт,  $V=200$  мм/мин,  $S=0,1$  мм,  $t=200$  °С, спеченных в аргоне и на воздухе наблюдалось резкое изменение качества поверхностного слоя, прочности. Шероховатость изменяется с 750 до 115 мкм, толщина спеченного слоя изменяется незначительно с 1,0 до 0,915 мм. У образца, спеченного в аргоне, отсутствуют дефекты в виде продольных и поперечных трещин. Спекание в аргоне значительно улучшает качество поверхностного слоя, уменьшается шероховатость, отсутствуют дефекты.



Рис. 5. Внешний вид спеченной поверхности ПМС-1 (x2), режимы спекания:  $P=30$  Вт,  $V=200$  мм/мин,  $S=0,1$  мм,  $t=200$  °С, а – на воздухе; б – в аргоне

Для определения влияния механоактивации порошка на качество спеченного поверхностного слоя порошки подвергались механической обработке в течение одной и трех минут в центробежно-планетарной мельнице АГО-2. На рисунке 6 приведены сравнительные фотографии спеченного слоя медной порошковой композиции ПМС-1, полученные на разных режимах, порошка неактивированного и разной активации.

На рисунке 6 у спеченных образцов, полученных из механоактивированных порошковых материалов, шероховатость поверхности изменяется с 700 мкм у неактивированного до 426 мкм у спеченного порошка после трехминутной активации, при  $P=15$  Вт,  $V=200$  мм/мин,  $S=0,3$  мм,  $t=26$  °С.

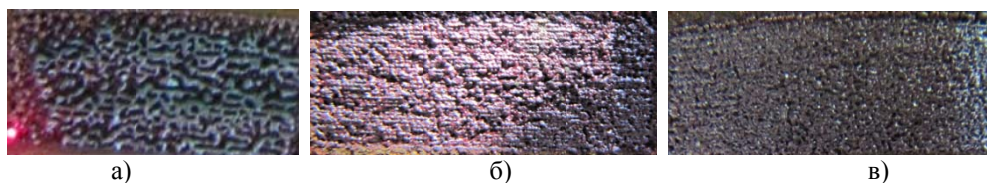


Рис. 6. Внешний вид спеченной поверхности ПМС-1 (x2), режимы спекания  $P=15$  Вт,  $V=200$  мм/мин,  $S=0,3$  мм,  $t=26$  °С

а – неактивированный, б – после минутной активации, в – после трехминутной активации

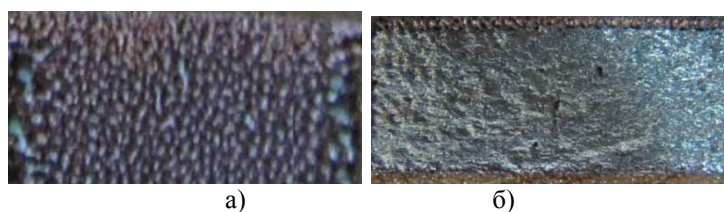


Рис. 7. Внешний вид спеченной поверхности ПМС-1 (x2), режимы спекания  $P=15$  Вт,  $V=200$  мм/мин,  $S=0,1$  мм,  $t=26$  °С

а – неактивированный, б – после минутной активации

Сравнение фотографий образцов наглядно показывает влияние механоактивации на качество поверхности: уменьшается коагуляция, шероховатость, образцы прочнее.

Проведенные исследования спеченного слоя из активированного и неактивированного порошкового материала показало, что предварительная механическая обработка оказывает влияние на про-



цесс спекания и приводит к улучшению качества поверхности: уменьшается диаметр коагулированных частиц, снижается шероховатость.

Сравнение графиков и результатов наблюдений за процессом спекания позволяют сделать вывод о том, что увеличение мощности приводит к вспучиванию поверхности, затем образовывается усадки и проплавление. Вероятно, в данном случае сказывается резкое увеличение теплопроводности модельного материала в момент плавления. Далее процесс стабилизируется, и увеличение мощности излучения не оказывает значительного влияния на толщину спекаемого слоя порошка.

Проведенные исследования показывают, что толщину спеченного поверхностного слоя и ее шероховатость  $R_z$  можно изменять в значительных пределах меняя технологические режимы лазерной обработки. Для получения спеченной поверхности разного качества предлагается разделить режимы формирования поверхности прототипа и его внутреннего объема на черновые, получистовые и чистовые, рисунок 8.

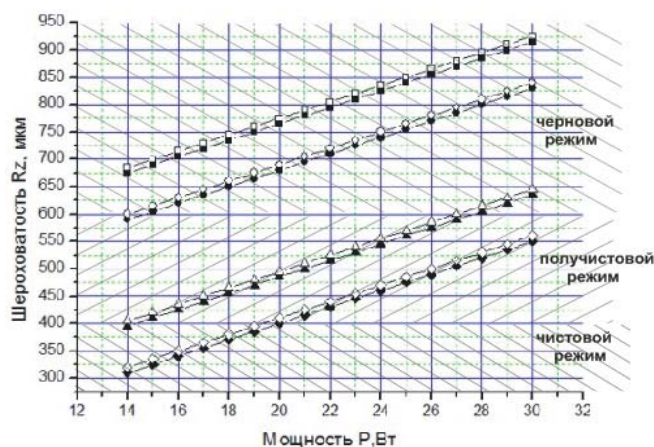


Рис. 8. Режимы спекания медного порошка

- $V=200\text{ мм/мин}$ ,  $t=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $S=0,3\text{ мм}$ ; —■—  $V=200\text{ мм/мин}$ ,  $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $S=0,3\text{ мм}$ ;
- ◇—  $V=200\text{ мм/мин}$ ,  $t=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $S=0,1\text{ мм}$ ; —●—  $V=200\text{ мм/мин}$ ,  $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $S=0,1\text{ мм}$ ;
- △—  $V=300\text{ мм/мин}$ ,  $t=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $S=0,3\text{ мм}$ ; —▲—  $V=3000\text{ мм/мин}$ ,  $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $S=0,3\text{ мм}$ ;
- ◇—  $V=3000\text{ мм/мин}$ ,  $t=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $S=0,1\text{ мм}$ ; —●—  $V=3000\text{ мм/мин}$ ,  $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $S=0,1\text{ мм}$ .

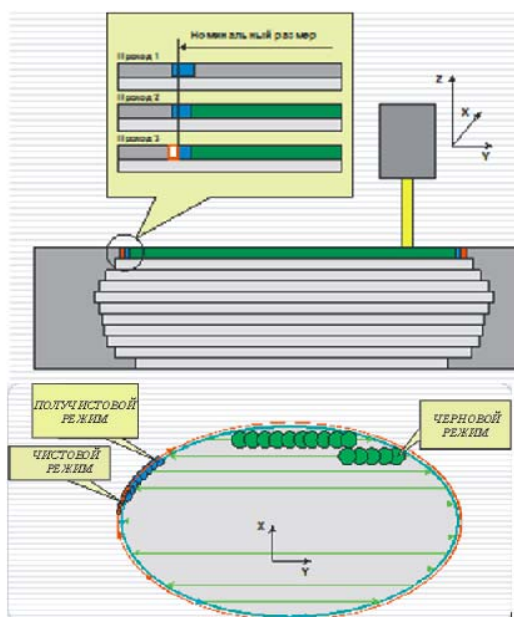


Рис. 9. Последовательность формирования единичного слоя

На черновых режимах, более производительных, необходимо формировать основной объем изделия, рисунок 9. Увеличение шероховатости поверхности (вспучивание) в данном случае играет положительную роль для прочного соединения слоев между собой. На получистовых режимах обработки производительность процесса послойного спекания снижается значительно, но при этом отпадает необходимость или значительно снижается трудоемкость дополнительной обработки поверхности прототипа для придания ей высоких точности и качества. Чистовая обработка может проводиться по необходимости. Режимы чистовой обработки можно назвать форсированными. Они включают в себя высокую плотность мощности излучения с коротким временем воздействия. В результате можно добиться, в зависимости от необходимости, процесса сублимации выступов микронеровностей поверхности или плакирования поверхности прототипа.

В результате проведенных экспериментов установлены рациональные области технологических

режимов послойного лазерного спекания медного порошка ПМС-1. Установлен характер влияния режимов лазерного спекания и получена математическая зависимость шероховатости спеченного поверхностного слоя от режимов спекания, позволяющий управлять процессом с целью получения качественного изделия. Показано положительное влияние защитной атмосферы и механоактивации порошковых материалов на качество спеченного поверхностного слоя. Направленное изменение свойств спеченного поверхностного слоя путем разделения режимов обработки на получистовой для поверхности и черновой для основного объема приводит к повышению качества поверхности изделия.

Литература.

1. C.R. Deckard, J.J. Beaman, "Recent advances in selective laser sintering" // Proceedings of the 14<sup>th</sup> Conference on Production Research and Technology, Michigan, 1987. P. 447-451.
2. Polmear IJ. Light alloys: metallurgy of the light metals. 3rd ed. London: Arnold; 1995.
3. Cam G, Kodak M. Progress in joining of advanced materials. Int Mater Rev 1998;43:1-44.
4. Mondolfo LF. Aluminium alloys: structure and properties. London: Butterworths; 1976.
5. Bias CT. In: Olsen FO, editor. Hybrid laser-arc welding. Woodhead Publishing Ltd: CRC Press; 2009. p. 216-69.
6. Seyda V, Kaufmann N, Emmelmann C. Investigation of aging processes of Ti-6Al-4V powder material in laser melting. In: Physics procedia of the 7th international conference & exhibition on photonic technologies LANE, vol. 39, Fürth, Germany; 2012. p. 425-31
7. Niu HJ, Chang ITH. Selective laser sintering of gas atomized M2 high speed steel powder. J Mater Sci 2000;35:31-8.
8. Asgharzadeh H, Simchi A. Effect of sintering atmosphere and carbon content on the densification and microstructure of laser-sintered M2 high-speed steel powder. Mater Sci Eng A 2005;403(1-2):290-8.
9. Liu ZH, Zhang DQ, Sing SL, Chua CK, Loh LE. Interfacial characterization of SLM parts in multi-material processing: metallurgical diffusion between 316L stainless steel and C18400 copper alloy. Mater Charact 2014;94:116-25.
10. Saprykina N A, Saprykin A A, Matrunchik M S, Formation of Surface Layer of Cobalt Chrome Molybdenum Powder Products with Differentiation of Laser Sintering Modes, Applied Mechanics and Materials 682 2014 p 294-298
11. Saprykin A A, Saprykina N A, Dudikhin D V, Emelyanenko S M, Influence of layer-by-layer laser sintering modes on the thickness of sintered layer of cobalt-chromium-molybdenum powder, Advanced materials research 1040 2014 p 805-808
12. Saprykina N A, Saprykin A A, Borovikov I F, Sharkeev Y P, Influence of layer-by-layer laser sintering conditions on the quality of sintered surface layer of products, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 91 2015 012031

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

*А.А. Скотников, ассистент,*

*Новосибирский государственный технический университет*

*630073, Новосибирск, пр. К.Маркса, 20, тел. (383) 3460442*

*E-mail: slen@ngs.ru*

Для реализации ударных технологий при обработке материалов давлением в машиностроении практическое применение нашли линейные электромагнитные машины различного принципа действия [1-5].

Среди класса электромагнитных машин, в качестве привода которых применяются линейные электромагнитные двигатели (ЛЭМД) следует выделить машины и устройства ударного действия с частотой хода бойка до 3000 ход/мин [6-11].

Результаты исследований, применения различных вариантов схем электромагнитных машин и устройств на основе ЛЭМД, подробно рассмотрены в работах [12, 13].

Обычно для этих целей используются электромеханические и пневматические ударные машины, для которых характерно наличие промежуточных преобразователей энергии, приводящих к дополнительным потерям, сложность в изготовлении, низкая долговечность, высокая квалификация обслуживающего персонала, повышенный уровень шума.